

水润滑下等离子喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层 增韧 SiC 陶瓷摩擦副的摩擦学特性

李剑锋, 蒋贤

(中国科学院上海硅酸盐研究所 等离子喷涂实验室, 上海 200050)

摘要: 采用 MM-200 型摩擦磨损试验机考察了等离子喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层 增韧 SiC 陶瓷摩擦副在蒸馏水润滑下的摩擦学特性, 通过对磨损表面形貌和磨屑的电子探针和傅立叶转换红外光谱分析, 探讨了其磨损机理. 结果表明: 在较低载荷下, SiC 与水发生摩擦化学反应, 在磨痕表面生成由 SiO_2 和硅胶组成的表面膜, 从而使得摩擦副呈现出优异的摩擦学特性; 在较高载荷下, SiC 陶瓷发生晶粒微观断裂, 从而使得摩擦系数升高并出现较大波动, 此时 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层的磨损率显著增大.

关键词: 等离子喷涂; $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层; SiC 陶瓷; 摩擦学特性

中图分类号: TG174.442

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2001)02-0090-04

热喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层具有优良的高温热稳定性和化学稳定性, 在航空发动机 汽轮机叶片和热轧钢辊上已获得较为广泛的应用^[1-3]. 对热喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层在干摩擦条件下的摩擦磨损行为和机理的研究较多^[4-8], 而对其在水润滑条件下的摩擦学特性的研究甚少. 我们的研究表明, 热喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层在蒸馏水润滑下的摩擦学特性较差^[9,10].

增韧 SiC 陶瓷自配副组成的摩擦副在蒸馏水润滑下表现出优异的摩擦磨损性能^[11]. 鉴于采用涂层代替整体材料可以显著地降低成本和成型的复杂性, 有效地用于修复磨损失效的零部件, 因此, 在某些应用场合, 采用涂层 整体材料摩擦副将是更为经济易

行的方案. 本文报道等离子喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层与增韧 SiC 陶瓷组成摩擦副在蒸馏水润滑下的摩擦磨损性能和磨损机理.

1 实验部分

摩擦磨损试验在 MM-200 型摩擦磨损试验机上进行, 摩擦副接触方式为环-环接触, 其中增韧 SiC 陶瓷试环静止, 等离子喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层试环转动, 2 种试环的尺寸均为 $\text{O}40\text{ mm} \times \text{O}16\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 环-环间接触线长度为 10 mm. 摩擦副材料的性能见表 1. 在摩擦磨损试验前, 试环表面均经研磨抛光, 其中 SiC 陶瓷试环的表面粗糙度 R_a 为 $0.19\text{ }\mu\text{m}$, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}$

表 1 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层和增韧 SiC 陶瓷的机械性能

Table 1 Mechanical properties of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating and toughened SiC ceramics

Material	Density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Porosity / %	Microhardness $HV_{0.2} / \text{GPa}$	Elastic modulus $/ \text{GPa}$	Bend strength $/ \text{MPa}$	Fracture toughness $/ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$	5.92	6.3	8.9	102	148	7.4
SiC	3.25	< 0.2	21.0	400	750	8.0

NiCr 涂层试环的表面粗糙度 R_a 为 $0.25\text{ }\mu\text{m}$. 在摩擦磨损试验过程中, 将转动试环浸入蒸馏水中以实现水润滑. 摩擦磨损试验中选用载荷 100 N、200 N、400 N、600 N、800 N 和 1 000 N, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层试环线速度分别为 0.42 m/s 和 0.84 m/s .

摩擦力矩从摩擦磨损试验机上直接读出, 将摩擦力矩除以载荷和试环半径即得摩擦系数. 磨损质量损失用精度为 0.1 mg 的 TG328B 型电光分析天平测定, 试环称重前均在丙酮中超声清洗 30 min, 然后在烘箱中于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥 30 min. 将磨损质量损失除

收稿日期: 2000-06-06; 修回日期: 2000-10-30 联系人李剑锋.

作者简介: 李剑锋, 男, 1968 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事热喷涂涂层工艺和结构及其摩擦学特性的研究.

以试环材料的密度以及摩擦磨损试验所用载荷和滑动距离即得到磨损率。

摩擦磨损试验结束后,仔细收集 SiC 陶瓷试环磨损表面的磨屑,然后采用 EPM A-8705Q HII 型电子探针观察试样磨损表面形貌,用 NIE-7199C 型红外光谱仪 (FTIR) 分析磨屑的组成。

谱仪 (FTIR) 分析磨屑的组成。

2 结果与讨论

图 (1和 2) 示出了摩擦磨损试验结果. 可见: 在相当宽的工况条件下, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层表现出优异的摩

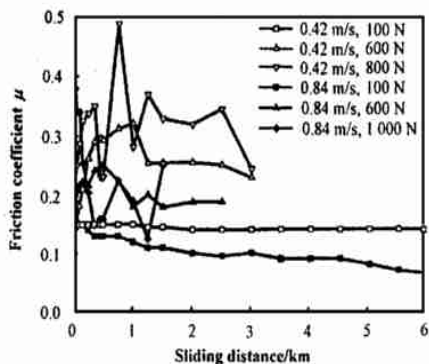


Fig 1 Friction coefficient vs. load and sliding distance at two kinds of sliding speed

图 1 摩擦系数随载荷和滑动距离的变化关系

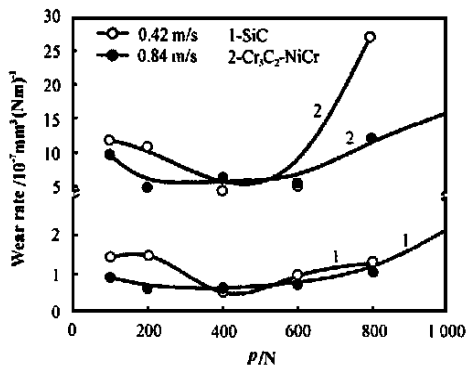


Fig 2 Wear rate vs. load and sliding speed

图 2 磨损率随载荷和滑动速度的变化关系

擦学特性;当载荷小于 400 N 时,其磨损率低于 $\times 10^{-6} \text{mm}^3 (\text{Nmm})^{-1}$,相应的摩擦系数小于 0.2,低于文献 [4~10] 报道的数据,尤其是磨损率低 1 个数量级以上;在相同载荷下,较低滑动速度 (0.42 m/s) 下的摩擦系数较高;当载荷超过一定值后,摩擦系数出现较大波动;当滑动速度为 0.42 m/s 时,摩擦系数在 600 N 以上载荷出现波动,而当滑动速度为 0.84 m/s 时,摩擦系数在 800 N 以上载荷出现波动。

层的磨损率均随着载荷的增加而降低,在载荷 400~600 N 范围内发生转折,随后 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层的磨损率随着载荷的增加而上升;当载荷超过 600 N 时,较低滑动速度下 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层的磨损率急剧增大;而 SiC 陶瓷在高载荷下的磨损率随速度的变化不大. 总体而言, SiC 陶瓷的磨损率明显比 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层的低。

从图 2 可见,在 2 种滑动速度下, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂

图 (3和 4) 示出了在 2 种滑动速度下的试环磨痕表面形貌 SEM 照片. 可以看出: 在不同载荷和滑动



(a) $\text{SiC}(p=100 \text{ N})$



(b) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}(p=100 \text{ N})$



(c) $\text{SiC}(p=600 \text{ N})$



(d) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}(p=600 \text{ N})$

Fig 3 SEM micrographs of wear tracks at a sliding speed of 0.42 m/s

图 3 滑动速度为 0.42 m/s 时的磨痕表面形貌 SEM 照片

速度下, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层的磨痕上均出现沿气孔和微裂纹等易发生应力集中部位的颗粒断裂;在较高载

荷的情况下, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层磨痕上还出现了微型沟 [见图 3(d) 以及图 4(b) 和 (d)], 表明磨损过程中发

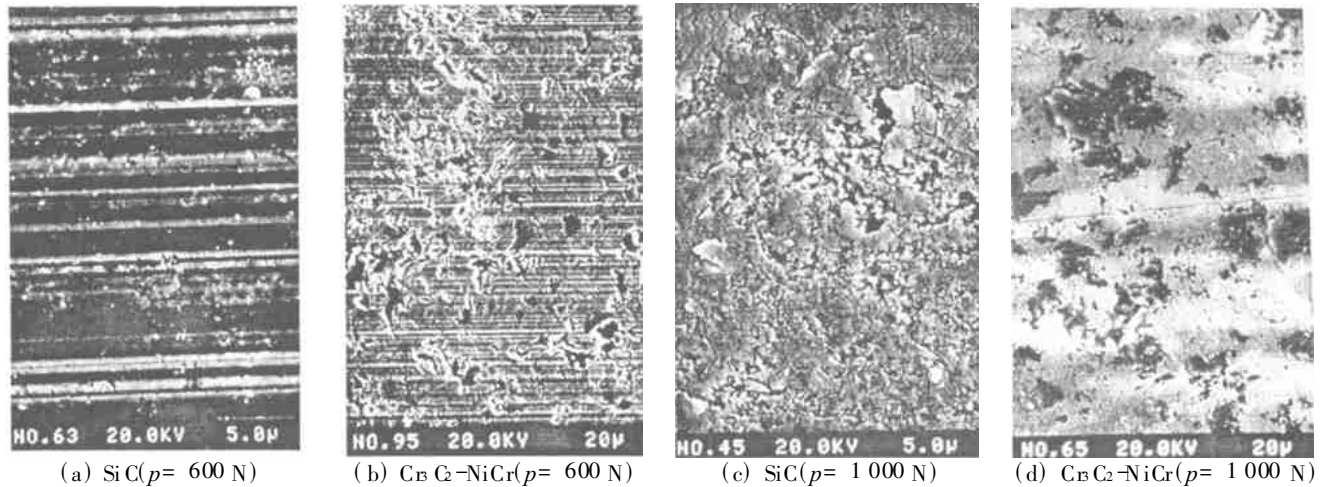


Fig 4 SEM micrographs of some worn tracks at the sliding speed of 400 r/min

图 4 滑动速度 400 r/min 下的磨痕形貌 SEM 照片

生了微观犁削;在 SiC 陶瓷磨痕上则可见细而密的微犁沟和晶粒的微观断裂,且载荷越高,晶粒的微观断裂越显著 [图 3(a 和 c) 以及图 4(a 和 c)].

图 5 示出了 SiC 陶瓷新鲜断口碎屑及 SiC 陶瓷

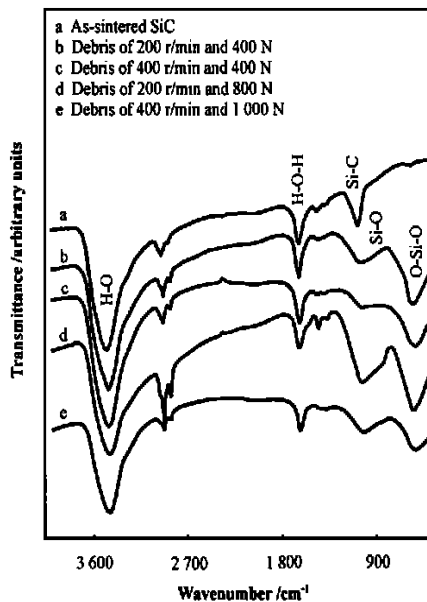


Fig 5 FTIR spectra of as-received fracture surface and some debris obtained from tracks of SiC ceramics

图 5 SiC 陶瓷新鲜断口和磨痕附近收集的磨屑的 FTIR 图谱

磨痕附近磨屑的 FTIR 图谱.可见,与原始 SiC 陶瓷的 FTIR 图谱相比,磨屑中含有 SiO₂ 和硅胶等化合物^[11-13].这说明在摩擦磨损试验过程中, SiC 与水发生了摩擦化学反应,从而在磨痕表面生成由 SiO₂ 和硅胶组成的表面膜.在较高载荷下,磨屑的 SiC 特征

吸收峰的强度与 SiO₂ 和硅胶的特征吸收峰强度相比明显减弱,这与图 3(c) 和图 4(c) 所示在较高载荷下 SiC 易发生晶粒微观断裂的结果相一致.

SiC 陶瓷磨痕表面的反应膜具有较低的硬度和剪切强度,能降低接触表面真实接触部位的垂直应力和剪切应力强度,从而降低摩擦系数和磨损率.由于反应膜较软,在滑动过程中易受到 Cr₃C₂-NiCr 涂层表面硬质微突体或粘附的硬质磨屑的犁削作用,结果在 SiC 陶瓷磨痕上留下细而密的微犁沟 [图 3(a 和 c) 和图 4(a)].在较低载荷下, SiC 陶瓷的磨损主要表现为表面反应膜的水解和微观犁削;在较高载荷下,因接触表面应力较高, SiC 陶瓷发生明显的晶粒微观断裂 [图 3(c) 和图 4(c)];晶粒微观断裂一方面使 SiC 陶瓷本身的磨损率增大,另一方面使得 Cr₃C₂-NiCr 涂层受到的挤压和犁削作用增强,从而使涂层的磨损率增大,且随载荷的变化发生明显的转折 (见图 2).

在流体介质中,摩擦副的接触表面还可形成流体动压膜.虽然水的粘度较低,所形成的流体动压水膜较薄,尚不足以完全分隔摩擦副材料的接触,但能够起到一定的承载和边界润滑作用,从而降低摩擦系数.根据线接触的 Dowson 流体膜厚公式^[14],流体动压膜的厚度随载荷的增加而减小,随滑动速度的增加而增大.因此 Cr₃C₂-NiCr 涂层与增韧 SiC 陶瓷在水润滑下对磨时,摩擦系数基本上随载荷的增加而增大,而在较低滑动速度下的摩擦系数较高 (图 1).

3 结论

a. 等离子喷涂 Cr₃C₂-NiCr 涂层增韧 SiC 陶瓷摩擦副在水润滑条件下的摩擦系数随载荷的增加

而增大; $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层的磨损率随着载荷的增加而降低, 随后随着载荷的增加而增大; 在较低滑动速度下的摩擦系数和磨损率较高。

b. 在较低载荷下, SiC 与水发生摩擦化学反应, 在磨痕表面生成由 SiO_2 和硅胶组成的反应膜, 从而有效地降低了表面真实接触部位的垂直应力和剪切应力强度, 使得摩擦系数和磨损率降低。

c. 在较高载荷下, SiC 陶瓷发生明显的晶粒微观断裂, 产生的磨屑对 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层造成较强的挤压和犁削作用, 从而使涂层的磨损率增大, 而摩擦系数亦出现较大波动。

参考文献:

- [1] Barbezat G, Moens J R, Nicoll A R. Properties and applications of CDS coatings[J]. *Materials & Design*, 1992, 13(3): 145~ 148.
- [2] Takeuchi J, Muratay Y, Haraday Y, *et al.* An improvement of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ sprayed coatings followed by chromium diffusion treatment[C]. *Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference*. Nice, France, 1998. 1 425~ 1 430.
- [3] Sielski D R, Sahoo P. Chromium carbide coatings for high temperature erosion resistance[C]. *Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems*, Berndt C C (Ed), Published by ASM International, Materials Park, Ohio-USA, 1996. 159~ 166.
- [4] 金元生, 夏为民, 程华. 等离子喷涂陶瓷涂层摩擦学特性的实验[J]. *清华大学学报*, 1992, 32(5): 17~ 25.
- [5] Corte C D, Sliney H E. Composition optimization of self-

lubricating chromium-carbide-based composite coatings for use to 760°C [J]. *Tribology Transactions*, 1995, 38 (4): 845~ 850.

- [6] Mohanty M, Smith R W, Bonte M D, *et al.* Sliding wear behavior of thermally sprayed 75/25 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ wear resistant coatings[J]. *Wear*, 1996, 198 251~ 266.
- [7] Li J F, Ding C X, Huang J Q, *et al.* Wear mechanism of plasma-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ against TiO_2 coating [J]. *Wear*, 1997, 211 177~ 184.
- [8] Li J F, Ding C X. Improvement in tribological properties of plasma-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating followed by electroless Ni-based alloy plating [J]. *Wear*, 2000, 240: 180~ 185.
- [9] Li J, Zhang Y, Huang J, *et al.* Mechanical and tribological properties of plasma-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, WC-Co and Cr_2O_3 coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, 7 (2): 242~ 246.
- [10] Li J F, Huang J Q, Zhang Y F, *et al.* Friction and wear behavior of plasma-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ against TiO_2 coating under water- and ethanol-lubricated sliding [J]. *Wear*, 1998, 214 202~ 206.
- [11] Li J F, Huang J Q, Tang S H, *et al.* Tribological properties of silicon carbide under water-lubricated sliding [J]. *Wear*, 1998, 218 167~ 171.
- [12] Rao C N R. *Chemical Applications of Infrared Spectroscopy* [M]. New York: Academic Press, 1963. 339~ 342.
- [13] Nyquist R A, Kagel R Q. *Infrared Spectra of Inorganic Compounds* [M]. New York and London: Academic Press, 1971. 94~ 95, 216~ 217.
- [14] 温诗铸. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990. 227~ 234.

Tribological Properties of Plasma-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ Coating against Toughened SiC Ceramics under Water-lubricated Sliding

LI Jian-feng, DING Chuan-xian

(Laboratory of Plasma Spraying, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract The tribological properties of plasma-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating sliding against toughened SiC ceramics under water-lubricated condition were investigated on an MM-200 friction and wear tester. The morphology of the worn surface and the elemental composition of the wear debris were examined by means of electron probe micro-analysis and (Fourier transformed infrared) spectroscopy. It has been found that the friction pair records a friction coefficient below 0.2 and wear rates less than $10^{-6} \text{mm}^3 (\text{N m})^{-1}$. Under water-lubricated condition at a relatively low load, tribochemical oxidation of SiC took place, with the generation of the protective film composed of SiO_2 and $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ formed on the worn surface. This contributes to decrease the friction coefficient and wear rate. While under a relatively high load, local grain fracture of SiC ceramics occurred, which accounts for the fluctuation in the friction coefficient and the increase in the wear rates of the $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating.

Key words plasma spraying; $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating; SiC ceramics; tribological properties